

李悦,纪梦为,李冲.环境温度对板式橡胶支座摩擦滑移性能的影响分析[J].地震工程学报,2021,43(3):672-678.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.672

LI Yue,JI Mengwei,LI Chong.Influence of Environmental Temperature on the Frictional Sliding Performance of Plate Rubber Bearings[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(3):672-678.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.672

环境温度对板式橡胶支座摩擦滑移性能的影响分析

李悦¹,纪梦为¹,李冲²

(1. 北方工业大学土木工程学院,北京 100144;

2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司,北京 100088)

摘要:采用有限元模拟的方式,对板式橡胶支座摩擦滑移特性进行分析,并与常温试验中获得的支座摩擦滑移滞回曲线、等效黏滞阻尼比等进行了对比。在获得可靠模型的基础上,分析环境温度对板式橡胶支座摩擦滑移特性的影响,研究了温度与支座摩擦滑移耗能、等效黏滞阻尼比和滑动起始距离的关系。结果表明:(1)板式橡胶支座的有限元模型可以较好地实现支座在水平荷载作用下的摩擦滑移特性;(2)在±25℃温度范围内,温度越低,板式橡胶支座在摩擦滑移过程中耗能越多,最大相差37.5%。在寒冷地区,支座将更早的进入滑移状态,对采用板式橡胶支座的桥梁更应注意控制桥梁上部结构的支承长度;(3)板式橡胶支座的黏滞阻尼比随着形状系数的减小而增大,而支座的起始滑移距离则随之减小。

关键词:板式橡胶支座;地震;数值模拟;橡胶参数;低温

中图分类号:U422.5+5

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2021)03-0672-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.672

Influence of Environmental Temperature on the Frictional Sliding Performance of Plate Rubber Bearings

LI Yue¹, JI Mengwei¹, LI Chong²

(1. College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. CCC Highways Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The environmental temperature can affect the physical properties of rubber, thus influence the dynamic response of plate rubber bearings under earthquake. In this paper, the finite element method was used to analyze the frictional sliding characteristics of plate rubber bearings. The hysteretic curve and equivalent viscous damping ratio of the bearing were compared with those obtained from normal temperature experiment. Based on a reliable model, the influence of environmental temperature on the friction sliding characteristics of plate rubber bearing was analyzed. Relationship between the temperature and the energy consumption, the equivalent viscous damping ratio, and the starting distance of sliding were also studied. The results showed that:

收稿日期:2019-12-03

基金项目:国家自然科学基金(51408009);北京市属高校基本科研业务费项目(110052971921/062);北方工业大学毓优人才支持计划(XN012/044)

第一作者简介:李悦(1979-),男,副教授,主要从事工程结构物抗震减灾工作。E-mail:liyue_26@163.com。

(1) The finite element model can well show the frictional sliding characteristics of plate rubber bearing under horizontal load; (2) Within the temperature range studied in this paper, the lower the temperature, the more energy consumption of plate rubber bearing in the friction sliding process, and the bearing will earlier enter the sliding state. So it is important to control the supporting length of upper structure of the bridge in cold area. (3) With the decrease of shape coefficient, the viscous damping ratio of plate rubber bearing is increased, and the initial sliding distance of the bearing was decreased.

Keywords: plate rubber bearing; earthquake; numerical simulation; rubber parameters; low temperature

0 引言

由于构造简单、安装方便、造价低,梁式桥中常采用板式橡胶支座传递桥梁上部结构与桥墩间,在地震、风、车辆等动荷载作用下产生的水平荷载。汶川地震后,通过对桥梁的震害调查发现,桥梁的破坏程度与支座的型式有关^[1-2]。活放的板式橡胶支座在地震作用下产生滑移,减少了传递到桥墩上的惯性力,起到了“保险丝”式单元的作用^[3]。地震时,板式橡胶支座的摩擦滑移降低了桥梁墩柱损伤,但增大了桥梁上部结构落梁的风险^[4]。目前,国内外学者对板式橡胶支座在水平荷载作用下的摩擦滑移力学性能进行了研究。王伟等^[5]提出了 Mooney-Rivlin 模型中橡胶材料的模拟参数。李枝军等^[6]通过试验提出应把 100% 剪切变形作为板式橡胶支座在地震作用下产生滑动的指标。李冲等^[7-8]通过开展矩形板式橡胶支座在水平荷载下的试验和模拟研究,对影响支座耗能的主要因素进行了分析。Steelman 等^[9-11]通过试验,对影响支座摩擦滑移性能的支座刚度、阻尼比等特性进行了分析,并提出了考虑支座摩擦滑移进行桥梁减震的计算模型。而在支座试验的基础上,李建中等^[12-17]对采用板式橡胶支座的规则梁桥进行了动力性能分析,提出了桥梁结构地震位移控制方法。徐略勤等^[17]分析了地震作用下板式橡胶支座摩擦滑移对非规则梁桥碰撞效应的影响。在桥梁抗震中,铅芯橡胶支座也是重要的一部分,王丽等^[18]对采用钢支座、板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的普通铁路简支梁桥结构的地震响应特性和减隔震性能进行了比较,并提出了铅芯直径对抗震性能的影响。吴斌等^[19]对铅芯橡胶支座进行了试验研究,提出了铅芯支座的非线性参数计算公式进行了分析。

我国国土南北跨度大,板式橡胶支座的环境温度有较大差异。寒冷地区冬季最低气温更是达到 -30° 左右,环境温度对橡胶材料力学性能有较大影

响^[20],进而影响到桥梁在地震作用下的反应^[21]。然而对于板式橡胶支座在地震作用下的摩擦滑移性能的研究一般是在常温状态下进行的,对低温下的研究较少。因此,为研究环境温度对板式橡胶支座摩擦滑移性能的影响,在支座摩擦滑移性能试验的基础上,建立了考虑温度影响的板式橡胶支座三维有限元分析模型。在验证模型正确的前提下,分析温度对支座摩擦滑移滞回性能、等效黏滞阻尼比及滑移点的影响,以期为低温环境下采用板式橡胶支座的桥梁进行抗震设计和分析提供依据和参考。

1 板式橡胶支座摩擦滑移试验及模拟

1.1 试验概况

为了获得常温下支座摩擦滑移的性能参数,开展了不同压力下的支座摩擦滑移试验,加载装置如图 1 所示。在支座上顶面专门制作了连接板,以便支座与加载设备进行连接,支座底部为常规的橡胶垫层,用于与支承垫石摩擦。支座采用单面锚固,通过上封板将支座顶面与加载装置连接,在水平往复荷载作用下,支座底面橡胶层在支承面上发生摩擦滑移(图 2),试件参数列于表 1。采用水平位移与支座橡胶层厚度的比值,即等效剪切应变表示加载位移。

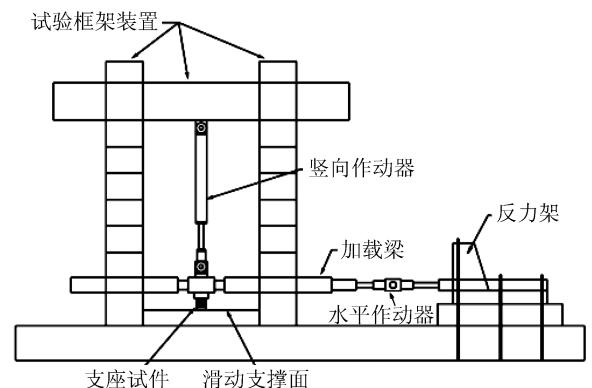


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

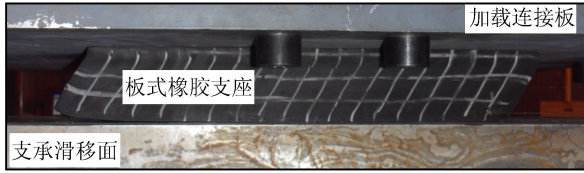


图2 支座摩擦滑移试验布置图

Fig.2 Layout of frictional sliding test on bearings

表1 支座试验参数

Table 1 Test parameters of bearings

序号	支座型号	橡胶总厚度/m	形状系数	竖向荷载/MPa
R1	GJZ 500×550×78	0.048	16.37	4
R2	GJZ 500×550×78	0.048	16.37	6
R3	GJZ 500×550×78	0.048	16.37	8
R4	GJZ 500×550×78	0.048	16.37	10

注:1.支座的设计满足《公路桥梁板式橡胶支座规格系列》(JT/T663-2006)的要求。

2.支座的竖向压应力满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(GTJ D62-2004)中支座平均压应力限值为 10 MPa 的要求。

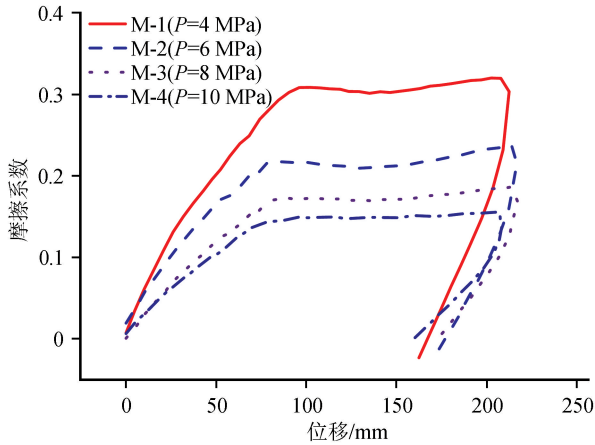


图3 摩擦系数与位移关系

Fig.3 Relationship between friction coefficient and displacement

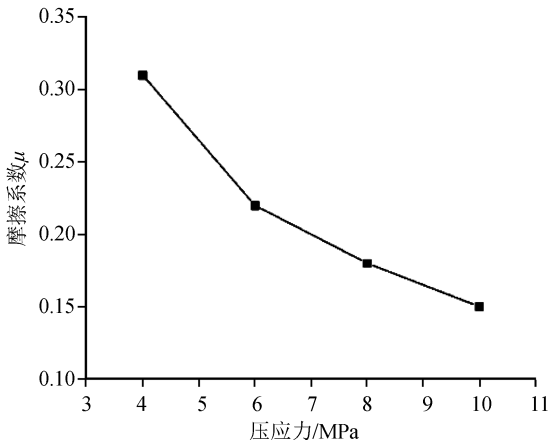


图4 摩擦系数与压应力关系

Fig.4 Relationship between friction coefficient and compressive stress

试验结果表明,板式橡胶支座在往复荷载作用下将产生摩擦滑移耗能,竖向压力会使其剪切变形增大,滑移距离减小,如图3所示;且滑移摩擦系数与竖向压力呈反比例关系,如图4所示。具体试验过程及结果详见文献[23]。

1.2 有限元模型的建立

为了研究环境温度对板式橡胶支座摩擦滑移性

能的影响,采用 ABAQUS 有限元分析软件建立板式橡胶支座分析模型,通过调整材料属性、摩擦接触及有限元网格等参数,实现与实物试验结果具有较好的契合度,保证模型计算精度。

由于橡胶的超弹不可压缩性,计算时采用 Mooney-Rivlin 本构模拟橡胶材料的力学性能。取常温下支座剪切模量 G 为 1.0 MPa,计算可得橡胶材料本构参数 $C_{10}=0.42$ 和 $C_{01}=0.11$,从而确定出橡胶的 Kirchoff 应力张量和 Green 应变张量的关系。试验用支承钢板和支座内的钢板则采用线弹性模型模拟,取弹性模量 E 为 2×10^5 MPa,泊松比 μ 为 0.3。其中橡胶层采用减缩积分六面体单元进行网格划分,钢板则采用杂交六面体单元划分网格,考虑到计算收敛效果及准确性,网格大小定义为 10 mm。

另外,支座摩擦滑移试验表明,支座内部钢板和橡胶不会发生撕裂破坏。因此,模拟时支座内部橡胶与钢板的连接采用绑定约束。而支座与支承钢板间的滑移摩擦则采用库伦模型模拟。同时,采用 Newton-Raphson 求解器,考虑支座在大变形状态下的几何非线性问题。图5为支座有限元模型及在 6 MPa 竖向压力下等效剪切变形达到 300%时支座的变形情况。

1.3 支座摩擦滑移性能

为了验证板式橡胶支座模型的有效性,首先将有限元模拟得到的不同压力下的支座水平力-位移滞回曲线与支座摩擦滑移试验结果进行了对比,如图6所示(以竖向压强 6 MPa 下试件 R1 为例)。由图可见,模拟结果与试验曲线吻合度较好,表明有限

元模型能够较好的反映支座摩擦滑移各阶段的水平剪切变形和滞回耗能特性。其中存在的偏差主要是

由于橡胶材料本构模型无法完全反映加载初期橡胶层强度退化和硬化现象所导致。

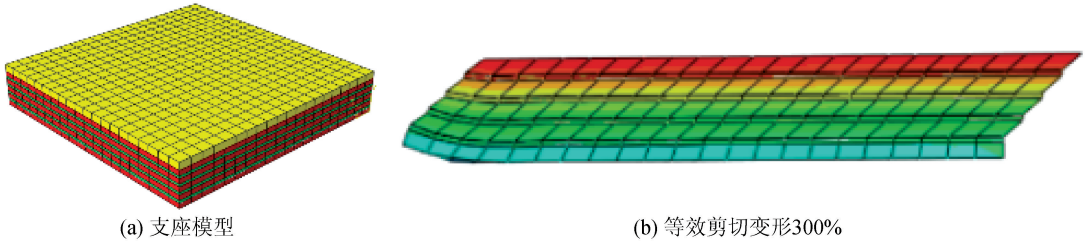


图 5 支座有限元模型及变形图

Fig.5 Finite element model and deformation diagram of bearing

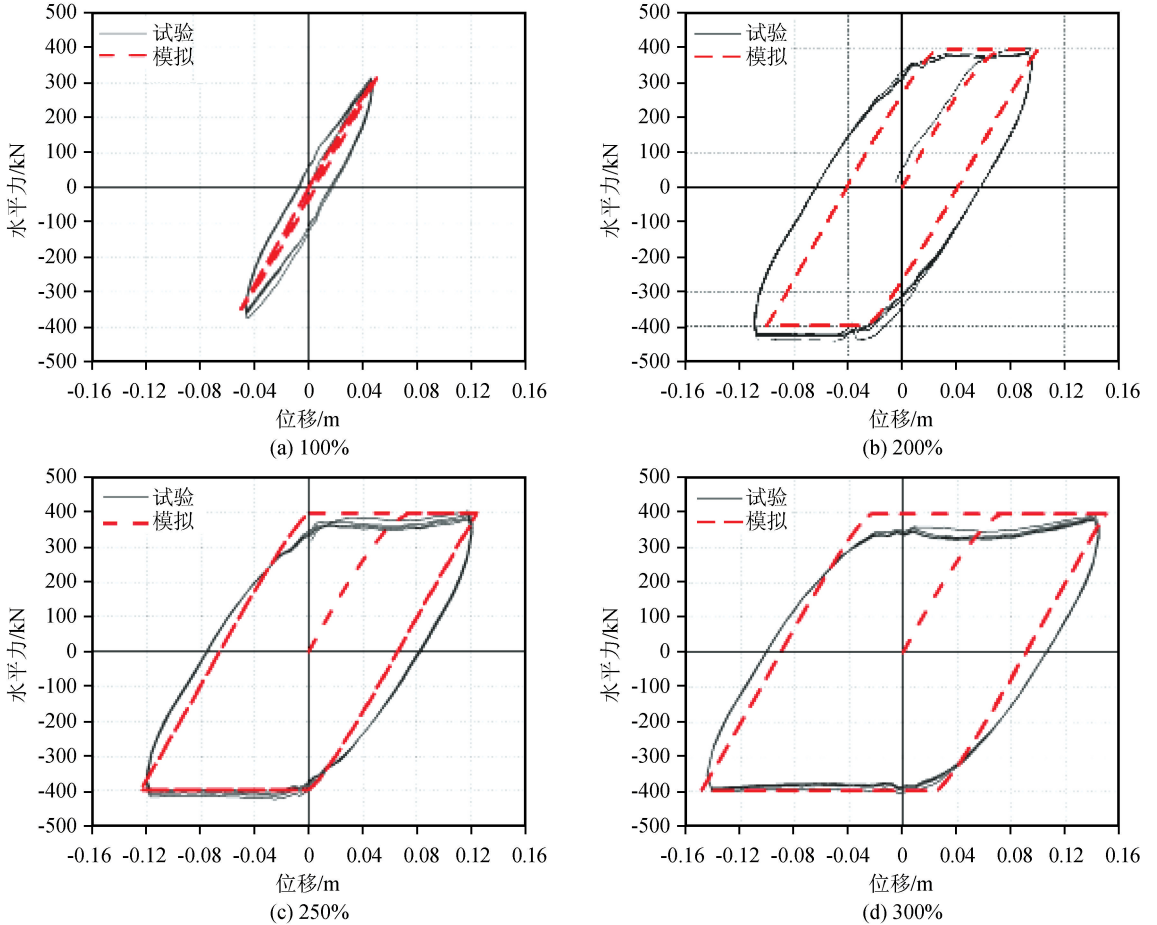


图 6 300%水平位移模拟、试验结果(6 MPa)

Fig.6 Simulation and test results of 300% horizontal displacement (6 MPa)

此外,对比分析了支座开始滑移后,即等效剪切应变大于等于 200%时的等效黏滞阻尼比,以 R1 和 R2 为例(表 2)。结果表明,二者数值较为接近,最大相差不超过 10%。以上对比结果表明有限元分析模型能够较好地反映支座摩擦滑移的耗能特性。

表 2 试验、模拟等效黏滞阻尼比对比

Table 2 Comparison of tested and simulated equivalent viscous damping ratios

等效剪切 变形	R1		R2	
	试验/%	模拟/%	试验/%	模拟/%
200	25.2	23.88	33.5	33.89
250	34.9	31.85	37.8	35.36
300	40.2	37.15	41.3	37.36

2 温度对支座摩擦滑移性能的影响

为进一步分析环境温度对支座摩擦滑移性能的

影响,建立了 4 种不同形状系数的支座模型,模型参数列于表 3。

表3 支座模型参数

Table 3 Parameters of bearing model

序号	支座型号	橡胶总厚度/m	橡胶层数	形状系数
S1	GJZ 500×550×60	0.04	5	16.38
S2	GJZ 500×550×70	0.05	5	13.10
S3	GJZ 500×550×80	0.06	5	10.91
S4	GJZ 500×550×95	0.75	5	8.73

由《公路桥梁板式橡胶支座技术标准》(JT/T 4-2004),取寒冷地区气温低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时支座剪切模量 G 为 2.0 MPa ,计算可得橡胶材料本构参数 $C_{10}=0.833$, $C_{01}=0.168$ 。由文献[22],取低温时支座摩擦系数 0.38 。

2.1 温度对板式橡胶支座摩擦滑移耗能的影响

在相同竖向压力(4 MPa)作用下,对比了常温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和低温 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下支座在水平往复荷载下的滞回曲线。以S1为例,如图7所示,在各个位移加载阶段,温度越低支座的摩擦滑移耗能效果越好。在等效剪切应变 100% 时,低温下支座摩擦滑移耗能比常温下多 37.50% 。

2.2 温度对支座等效黏滞阻尼比的影响

图8为支座的等效黏滞阻尼比与温度的关系曲

线。可以看出,随着温度的升高,支座的黏滞阻尼比在不断降低,其中S4号支座在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,黏滞阻尼比相差了 17% ,这与已有试验的结果相吻合[21]。同时,随着形状系数的减小,橡胶层厚度不断加大,支座的黏滞阻尼比随之增大。

2.3 温度对支座摩擦滑动起始距离的影响

板式橡胶支座的起始滑移距离是支座在水平地震作用下由可控转变为不可控运动状态的重要参考,支座在该点将由静摩擦转变为滑移摩擦,对于桥梁上部结构的位移控制具有较大影响。如图9所示,随着温度的升高($-25\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$),支座的起始滑移距离也越大,支座进入摩擦滑移状态的水平位移越长。这主要是由于寒冷状态 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时板式橡胶支座的剪切刚度大于常温状态 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致在相同上

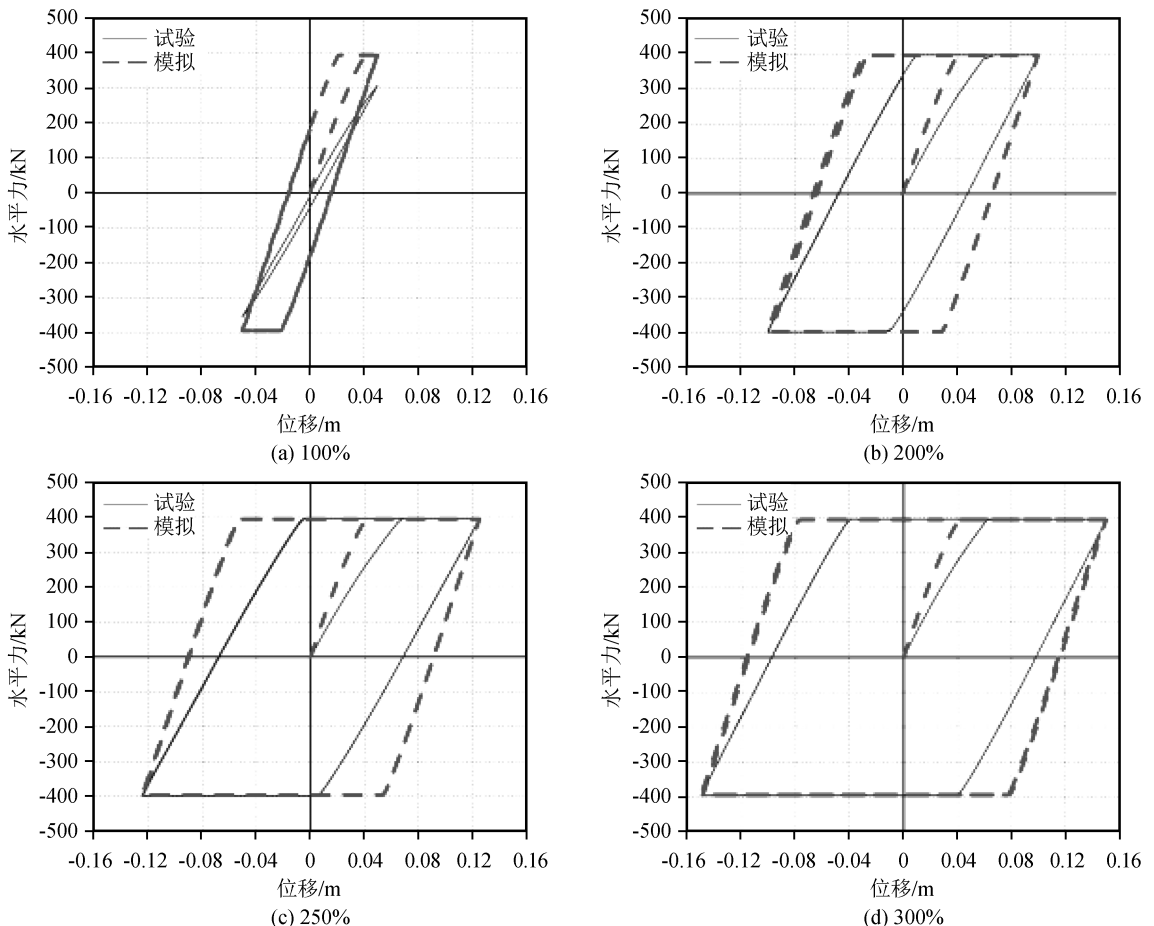


图7 环境温度对支座滞回性能的影响(3.45 MPa)

Fig.7 Influence of ambient temperature on hysteretic behavior of bearing (3.45 MPa)

表 4 环境温度对支座耗能的影响

Table 4 Influence of temperature on energy consumption of bearing

等效剪切 变形/%	滞回曲线面积/(kN·m)		差值/%
	常温 25 °C	低温 -25 °C	
100	15	24	37.50
200	68	104	34.62
250	102	144	29.17
300	152	184	17.39

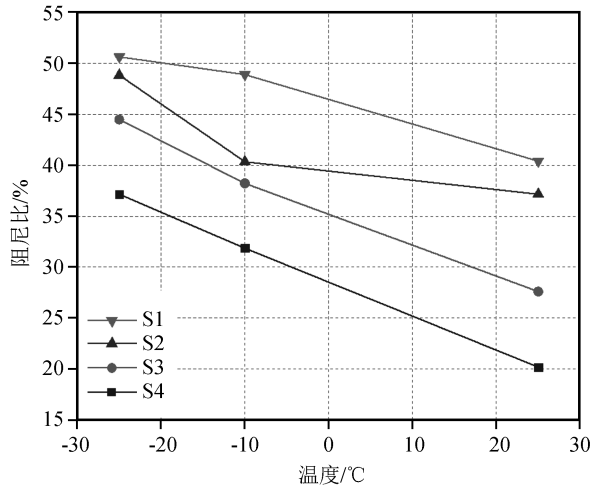


图 8 温度对支座等效黏滞阻尼比的影响

Fig.8 Effect of temperature on equivalent viscous damping ratio of bearing

部结构位移作用下, -25 °C 时的支座剪切变形更小, 更早的进入摩擦滑移状态。因此, 对于寒冷地区采用板式橡胶支座的桥梁更应注意控制地震作用时桥梁上部结构的位移, 防止落梁。

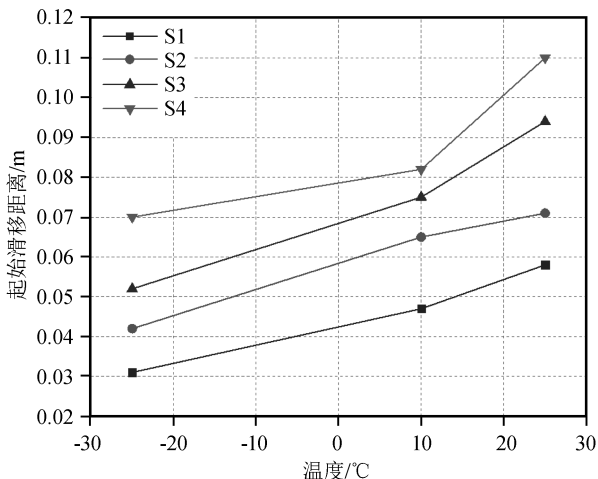


图 9 温度对起始滑移距离的影响

Fig.9 Effect of temperature on the initial slip distance

同时, 支座的形状系数越小起始滑移距离相对越小, 即支座橡胶层厚度越大, 支座越高, 进入滑移

状态时对应的上部结构的位移越小。因此, 采用小形状系数板式橡胶支座的桥梁更应注意地震作用时由于支座移位导致的桥梁震害。

3 结论

桥梁震害表明板式橡胶支座的摩擦滑移具有减轻桥梁破坏的效果, 同时环境温度会对支座的力学性能有较大的影响, 因此通过建立摩擦滑移有限元模型与试验结果进行对比验证, 进一步分析了环境温度对支座摩擦滑移性能的影响主要结论如下:

(1) 板式橡胶支座的模拟结果能够较好的反映出摩擦滑移各阶段的特性, 与试验结果基本吻合。

(2) 环境温度会对板式橡胶支座的摩擦滑移性能产生影响。随着温度的降低, 板式橡胶支座的黏滞阻尼比不断升高, 摩擦滑移过程中的耗能不断增加。同时, 支座更早的进入到摩擦滑移状态, 即寒冷地区采用板式橡胶支座的桥梁, 更应注意控制桥梁上部结构的支承长度, 防止地震时发生落梁。

(3) 此外, 随着形状系数的减小, 橡胶层厚度不断加大, 支座的黏滞阻尼比随之增大。同时, 支座起始滑移距离相对越小, 因此, 采用小形状系数板式橡胶支座的桥梁更应注意地震作用时由于支座移位导致的桥梁震害。

参考文献(References)

- [1] 王克海, 李冲, 李茜, 等. 考虑支座摩擦滑移的中小跨径桥梁抗震设计方法[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 85-92.
WANG Kehai, LI Chong, LI Qian, et al. Seismic design method of small and medium span bridge considering bearing friction slipping[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 85-92.
- [2] 王克海, 李冲, 李悦. 中国公路桥梁抗震设计规范中存在的问题及改进建议[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 95-103.
WANG Kehai, LI Chong, LI Yue. Problems in Chinese highway bridge seismic specifications and suggestions for improvement [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 95-103.
- [3] 王克海, 韦韩, 李茜, 等. 中小跨径公路桥梁抗震设计理念[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 115-121.
WANG Kehai, WEI Han, LI Qia, et al. Philosophies on seismic design of highway bridges of small or medium spans[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 115-121.
- [4] 李悦, 李冲, 李茜. 地震作用下板式橡胶支座滑移对中小跨径梁桥抗震性能的影响[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊 1): 124-129.
LI Yue, LI Chong, LI Qian. Effect of elastomeric bearings slide on seismic performance of small and medium span girder bridges in earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47

- (Suppl):124-129.
- [5] 王伟,邓涛,赵树高.橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J].特种橡胶制品,2004,25(4):8-10.
WANG Wei, DENG Tao, ZHAO Shugao. Determination for material constants of rubber mooney-rivlin model[J]. Special Purpose Rubber Products, 2004, 25(4): 8-10.
- [6] 李枝军,葛飞,徐秀丽,等.板式橡胶支座性能有限元模拟与试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(6):1299-1304.
LI Zhijun, GE Fei, XU Xiuli, et al. Finite element simulation and experimental study of property for elastomeric pad bearing [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(6): 1299-1304.
- [7] 李冲.中小跨径梁桥基于性能的抗震设计方法研究[D].南京:东南大学,2015.
- [8] 吴刚,王克海,李冲,等.板式橡胶支座摩擦滑移特性参数分析[J].土木工程学报,2014,47(增刊1):108-112.
WU Gang, WANG Kehai, LI Chong, et al. Parametric finite element investigation of laminated rubber bearings with friction slipping[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Suppl): 108-112.
- [9] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, et al. Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearings subject to seismic demands[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 18(7): 612-623.
- [10] BIN Othman. Property profile of a laminated rubber bearing [J]. Polymer Testing, 2001, 20(2): 159-166.
- [11] KOO G H, LEE J H, LEE H Y, et al. Stability of laminated rubber bearing and its application to seismic isolation[J]. KSME International Journal, 1999, 13(8): 595-604.
- [12] 范立础,袁万城.桥梁橡胶支座减隔震性能研究[J].同济大学学报(自然科学版),1989,17(4):447-455.
FAN Lichu, YUAN Wancheng. Seismic isolation and energy absorption properties of elastomeric pad bearing for bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1989, 17(4): 447-455.
- [13] 范立础,李建中.汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J].公路,2009,54(5):122-128.
FAN Lichu, LI Jianzhong. Earthquake damage analysis and seismic design countermeasures of wenchuan bridge[J]. Highway, 2009, 54(5): 122-128.
- [14] 汤虎,李建中.板式橡胶支座桥梁地震位移控制方法[J].中国公路学报,2013,26(3):110-116.
TANG Hu, LI Jianzhong. Displacement control method for continuous bridges on laminated rubber bearings under earthquake excitation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 110-116.
- [15] 汤虎,李建中.地震动特性对公路桥梁板式橡胶支座滑动反应影响[J].工程力学,2013,30(10):154-161,170.
TANG Hu, LI Jianzhong. Effect of ground motion characteristics on sliding response of elastomeric pad bearings in highway bridges[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 154-161, 170.
- [16] 汤虎,李建中,邵长宇.中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震性能[J].中国公路学报,2016,29(3):55-65.
TANG Hu, LI Jianzhong, SHAO Changyu. Seismic performance of small and medium span girder bridges with plate type elastomeric pad bearings in the transverse direction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 55-65.
- [17] 吴彬,庄军生,臧晓秋.铅芯橡胶支座的非线性动态分析力学参数试验研究[J].工程力学,2004,21(5):144-149.
WU Bin, ZHUANG Junsheng, ZANG Xiaoqi. Experimental study of mechanical parameters of lead-rubber bearing by for nonlinear dynamic analysis[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(5): 144-149.
- [18] 徐略勤,李建中,吴陶晶.碰撞效应对非规则梁桥横向地震反应的影响[J].振动与冲击,2011,30(4):95-99,123.
XU Lueqin, LI Jianzhong, WU Taojing. Influence of pounding effects on transverse seismic response of a nonstandard girder bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 95-99, 123.
- [19] 王丽,闫维明,阎贵平.铅芯橡胶支座参数对隔震桥梁动力响应的影响[J].北京工业大学学报,2004,30(3):304-308.
WANG Li, YAN Weiming, YAN Guiping. Effect of the LRB parameters on the dynamic response of isolated bridges[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004, 30(3): 304-308.
- [20] AHMET YAKUT, M ASCE, JOSEPH A, et al. Parameters influencing performance of elastomeric bearings at low temperatures[J]. Struct. Eng., 2002, 128(8): 986-994.
- [21] 肖文杰.严寒地区温度对橡胶支座抗震性能影响分析[D].长春:吉林建筑大学,2016.
- [22] 公路桥梁板式橡胶支座规格系列:JT/T663-2006[S].北京:人民交通出版社,2006.
Series of elastomeric pad bearing for highway bridges: JT/T663-2006[S]. Beijing: China Communication Press, 2006.
- [23] 李悦,李冲,李茜,等.桥梁板式橡胶支座剪切破坏及摩擦滑移性能试验研究[J].铁道学报,2020,42(8):130-137.
LI Yue, LI Chong, LI Qian, et al. Experiment of shear and friction sliding performance of elastomeric bearings of bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 130-137.